

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 93 (2001)
Heft: 7-8

Artikel: Elastoplastisches Deformationsverhalten von Kriechhängen
Autor: Curschellas, Arno / Steiger, Felix
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939907>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Elastoplastisches Deformationsverhalten von Kriechhängen

■ Arno Curschellas, Felix Steiger

Problemstellung

Allgemeines

Eine grosse Zahl schweizerischer Stauanlagen ist mit der Problematik von Kriechhängen konfrontiert. Durch das jahreszeitliche und über Dekaden schwankende Kriechverhalten verlangen diese Hänge eine intensive Überwachung und eine angepasste Risikobeurteilung, sowohl beim normalen Betrieb als auch bei aussergewöhnlichen Ereignissen und eventuellen Ausbauplänen.

Da die Beurteilung abgesehen von den meteorologischen Einflüssen von einer ganzen Reihe von geotechnischen, geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen abhängt, ist es für jedes einzelne Problem wichtig, die geotechnische Aufgabenstellung ganzheitlich zu betrachten und die vereinfachenden Annahmen sowie deren Auswirkung auf die Sicherheit kritisch zu hinterfragen.

Geotechnik

Traditionelles Vorgehen

Die Beurteilung von Kriechhängen basiert auf der für Rutschungen entwickelten Stabilitätsrechnung. Einer Gleitfläche lassen sich bei dieser Methode Scherspannungen und Scherfestigkeiten zuordnen. Aus dem Verhältnis der Scherspannung zur Scherfestigkeit resultiert ein Sicherheitsgrad FS.

Durch die Rückrechnung von bodenmechanisch genau analysierten Rutschungen konnte der Zusammenhang nachgewiesen werden, dass Rutschungen immer mit einer Sicherheit $FS \leq 1$ zusammenfallen.

Für Kriechhänge wurde und wird bei vielen Abklärungen der folgende überkonservative Ansatz verwendet: Kriechen = Rutschung, Sicherheit $FS \leq 1$, d.h. die Kriechmasse donnert ungebrems in den Stausee und löst eine nach Huber/Müller für einen analogen Felssturz berechnete Welle der Höhe $\times$ aus.

Da sich Kriechhänge mit typischen Verformungen von einigen Millimetern bis Zentimetern pro Jahr und Rutschungen mit Verformungen im Bereich von einigen Metern innerhalb von wenigen Stunden offensichtlich unterscheiden, wird der vorgängig skizzierte Ansatz vielfach durch eine Aussage zur Beschleunigung der Deformation ergänzt, die

bei der Beurteilung von Fels- und Gletscherabbrüchen sicher gerechtfertigt, bei Kriechhängen aber bedeutungslos ist.

In einer ersten Unterscheidung sollte unseres Erachtens das Scherverhalten der Kriechmasse in kohäsives Verhalten, wie es bei überkonsolidierten Tonen und Felsböschungen üblich ist, und kohäsionsloses Verhalten (=Reibungsverhalten), das für Sand- und Kiesablagerungen wie Hangschutt und aufgelockerte Moränen zutreffend ist, unterteilt werden.

Die Unterscheidung, ob es sich um einen Kriech- oder Rutschhang handelt, wird in der Regel dadurch erleichtert, dass sich Kriechhänge mit einem Reibungsverhalten durch eine Böschungsneigung auszeichnen, die unter dem Winkel der inneren Reibung liegt.

Bei Kriech- und Rutschhängen aus kohäsionslosem Hangschutt- und Moränenmaterial liegt der deformationsauslösende Schwachpunkt meist beim Hangwasser, d.h. beim örtlich ansteigenden Porenwasserdruck nach Niederschlägen und nach der Schneeschmelze.

Bei Kriechhängen können diese Einflüsse durch Spannungumlagerungen innerhalb der Kriechmasse abgefangen werden.

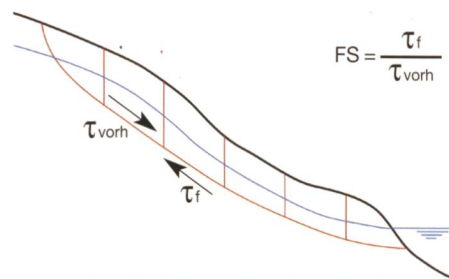


Bild 1. Zur Definition des Sicherheitsgrades FS.

Bei Rutschungen verschiebt sich die Rutschmasse, bis sich ein neues Gleichgewicht einstellt.

Differenziertes Vorgehen

Die folgenden Abschnitte beinhalten Vorschläge zu einem differenzierten Vorgehen für die Beurteilung von Kriechhängen. Es geht hier darum, die plastischen Deformationen mit dem elastischen Abbau von Eigenspannungszuständen zu verbinden.

Theorie

Idee

Mit Hilfe der nachfolgend beschriebenen Theorie sollen die Horizontaldeformationen eines Kriechhanges nach Durchlaufen einer Anzahl typischer Hangwasserstände (z.B. im Verlauf eines Jahres) abgeschätzt und beurteilt werden können.

Der neue Ansatz trennt die Sicherheitsüberlegungen der Stabilitätsrechnung und die Beurteilung der möglichen Deformationen so, dass Kriechbewegungen auch bei Sicherheitsfaktoren über $FS = 1,0$ bestimmt werden können.

Dies ist möglich, weil sich (unter dem Einfluss schwankender Porenwasserspannungen) in der Gleitfläche die in die Kriechmasse übertragenen Eigenspannungen sukzessive abbauen.

Unter Berücksichtigung der wechselnden Hangwasserspiegel sowie der vorhandenen Bodenkennwerte wird ein Modell erstellt, welches fundierte Prognosen zum wahrscheinlichen Deformationsverhalten zulässt.

Die charakteristischen Wasserstände (z.B. nach längeren Trockenphasen, Starkniederschlägen, Seespiegelschwankungen usw.) innerhalb einer Periode werden erfasst und modelliert. Für die Ermittlung der Gesamtdeformation (horizontal) einer Rutschung innerhalb einer festgelegten Periode werden die erfassten Zustände in zeitlicher Abfolge aneinander gereiht.

Die aus jedem einzelnen Zustand resultierenden Eigenspannungen fließen in den nächstfolgenden ein und verursachen dadurch einen Anstieg der Scherbeanspruchung im Fussbereich der untersuchten Gleitfläche.

Wie aus dem Titel des Artikels hervorgeht, werden für die Verknüpfung der Eigenspannungen mit der Verteilung der Scherspannung in der Gleitfläche ein elastischer und ein plastischer Ansatz gewählt.

Der elastische Ansatz ermöglicht eine einfache Beurteilung der bei der Entspannung der Kriechmasse zu erwartenden Dehnungen.

Der plastische Ansatz deckt die Interaktion zwischen der Kriechmasse und dem tiefer liegenden Erdreich auf der als Grenzfläche dienenden Gleitfläche ab.

Grundlegende Formeln

Grundlagen der Elastizitätslehre (Hook)

$$L = L_0 \pm \Delta L$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \varepsilon \cdot E$$

Grundlagen des plastischen Ansatzes nach Janbu:

$$FS = \frac{\sum [c' \cdot \Delta x + (G + V - u \cdot \Delta x) \cdot \tan \phi'] \cdot \frac{1}{n\alpha}}{[\sum (G + V) \cdot \tan \alpha] + H}$$

nach Bishop:

$$FS = \frac{\sum [c' \cdot \Delta x + (G + V - u \cdot \Delta x) \cdot \tan \phi'] \cdot \frac{1}{m\alpha}}{[\sum (G + V) \cdot \sin \alpha] + H \cdot \frac{a}{R}}$$

Plastischer Ansatz

Der plastische Ansatz basiert auf einer herkömmlichen Stabilitätsbetrachtung (im vorliegenden Fall nach Janbu).

Dabei wird eine Gleitfläche definiert und die darüber liegende Rutschmasse in einzelne Lamellen unterteilt. Für jede Lamelle, werden die Kräfte und die Inter-Lamellenkräfte ermittelt (vgl. Bild 2) und über obige Formel miteinander verknüpft.

Zur Ermittlung der den Eigenspannungszustand beschreibenden Horizontalkräfte E wird mit der obersten Lamelle (n) der

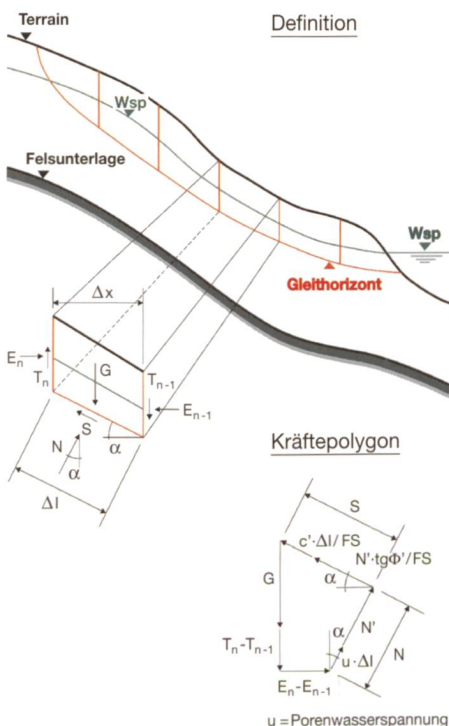


Bild 2. Definitionsskizze zum plastischen Ansatz nach Janbu.

Rutschung beim Anrisspunkt begonnen. Die Horizontalkraft, welche zur Stützung und somit für den labilen Gleichgewichtszustand (FS=1) dieser Lamelle notwendig ist, wirkt auf die nächste Lamelle (n-1) als «treibende» Kraft. Der Winkel α , der die Neigung der Gleitfläche unter der jeweils betrachteten Lamelle darstellt, nimmt mit zunehmender Entfernung vom Anrisspunkt (AP) einer Rutschung in der Regel ab (vgl. Bild 3). Die von α abhängigen treibenden Komponenten werden kleiner und die rückhaltenden Scherkräfte steigen an.

Schliesslich erreicht man im Laufe der Berechnungen die Lamelle (n-i). Diese Lamelle erhält auf Grund ihres Reibungswiderstandes und des abnehmenden Neigungswinkels α der Gleitfläche einen dermassen hohen Widerstand gegen Abgleiten, dass eine «stützende» Horizontalkraft für das Erreichen eines Gleichgewichts (FS=1) nicht mehr nötig ist. Somit wird auf die nächst folgende Lamelle keine Kraft mehr übertragen. Das heisst vom Anrisspunkt (AP) bis zur Lamelle (n-i) befindet sich nun ein Gleitkörper in einem Gleichgewichtszustand mit einer Sicherheit gegen Abgleiten von FS=1. Den Fusspunkt (FPK) dieses Gleitkörpers bezeichnen wir hier mit Z (vgl. Bild 4).

Anschliessend wird der eben beschriebene Vorgang auf den nächsten Zustand angewandt. Die Horizontalkräfte E der vorangegangenen Berechnung werden mit berücksichtigt und wo nötig erhöht.

Ein Ansteigen der Porenwasserspannung u in der Lamelle n-i reduziert z.B. die effektive Normalkraft N' und damit die Scherkraft S. Dadurch wird eine höhere Stützkraft E nötig, und der Druck wird auf die nächste Lamelle (n-i-1) weitergegeben. Der Punkt Z wandert weiter in Richtung des Fusspunktes (FP) (vgl. Bild 5).

In der eben beschriebenen Vorgehensweise werden nacheinander alle Zustände untersucht. Die massgebende Horizontalkraft aus diesen Vergleichen ist immer die jeweils grössere. Sie wird für die Betrachtung des nächsten Zustandes weiterverwendet.

Erreicht Punkt Z den Fusspunkt (FP) resp. überschreitet er diesen, so entspannt sich die Kriechmasse von unten her um den nicht mehr abgedeckten Betrag der letzten Horizontalkraft. Es entsteht eine Entspannung, welche die gesamte Kriechmasse erfasst (nur die oberste Lamelle bleibt stehen). Die Summe der Dehnungen kann beim Fusspunkt auf Grund des elastischen Berechnungsansatzes bestimmt werden.

Elastischer Ansatz

Nach der Entspannung der Kriechmasse werden die einzelnen Horizontalkräfte um

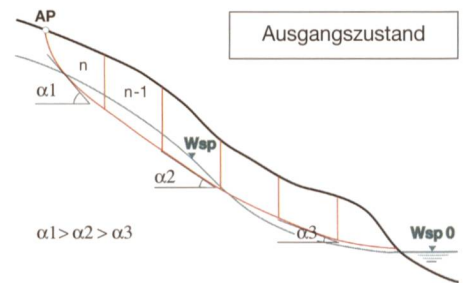


Bild 3. Typischer Verlauf des Neigungswinkels der Gleitfläche.

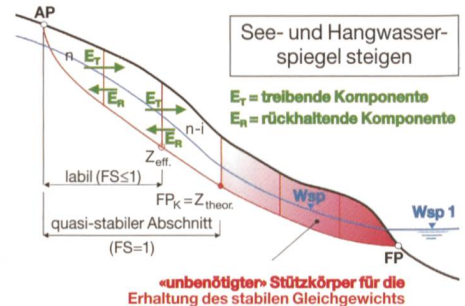


Bild 4. Gleitkörper mit FS = 1.

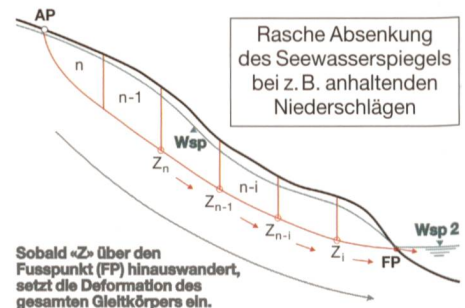


Bild 5. Gleitkörper instabil bis zum Fusspunkt.

den die Deformation auslösenden Betrag reduziert.

Die Kraftdifferenzen können in den einzelnen Lamellen in Spannungsdifferenzen umgewandelt werden, welche wiederum über das Hook'sche Gesetz in Dehnungen umgerechnet werden können.

Die Gesamtdeformation wird vereinfachend mit einem für alle Lamellen gleichen, konstanten E-Modul bestimmt. Diese Vereinfachung lässt sich einerseits auf Grund der geringen Spannungsdifferenzen bei der Entspannung verantworten und drängt sich andererseits wegen der Schwierigkeit auf, die mit der Ermittlung eines horizontalen E-Moduls zusammenhängen.

In der nachfolgenden Darstellung wird anhand eines rheologischen Modells die in den Bildern 3 bis 5 dargestellte Situation verdeutlicht.

Im Modell laufen die plastischen Vorgänge, welche auf der Stabilitätsrechnung basieren, im Bereich der übereinander liegenden Platten ab. Auf diese Art und Weise läuft der Prozess in der Gleitebene ab (vgl. dazu auch Bild 6a und 6b plastische Vorgänge).

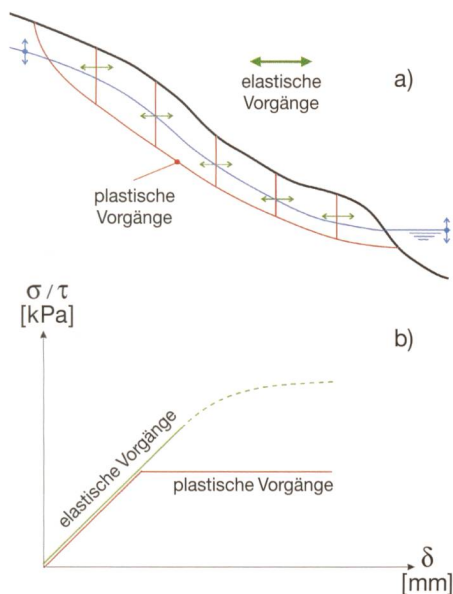


Bild 6a und 6b. Darstellung der elastischen und plastischen Vorgänge.

Die elastischen Vorgänge werden mit Hilfe der Federn dargestellt. Es gilt in dieser Darstellung die vektoriell dargestellten Kräfteverhältnisse zu beachten (Pfeile).

Besondere Aspekte

Allgemein

Geotechnische, hydrologische, geologische und hydrogeologische Daten stellen die Grundlagen für das Berechnungsverfahren dar.

Im Folgenden soll kurz auf die beim vorgestellten Verfahren besonders wichtigen Aspekte eingegangen werden.

Modellierung des Untergrundes und Einflussparameter

Das Baugrundmodell sollte auf Daten basieren, welche die folgenden Gesichtspunkte möglichst wirklichkeitsnah berücksichtigen:

- Topographie/Vermessung
 - Topographische Aufnahmen des Geländes resp. des Kriechhanges
 - Darstellung des zeitlichen Deformationsverhaltens von Vermessungspunkten
- Geologie/Hydrogeologie
 - Aufbau des Untergrundes/Baugrundmodell
 - Einschätzung der Durchlässigkeit im Feld (Absenkversuche in Bohrlöchern), Beurteilung der Versickerungskapazität des Bodens
 - Piezometermessungen für die Beurteilung des Hangwasserspiegels der typischen Phasen
 - Wasserspiegelschwankungen im See und im Hangwasser

- Frequenz der Wasserspiegelschwankungen
- Lage der Gleithorizonte, z.B. durch Auswertung von Inklinometer-Messungen.

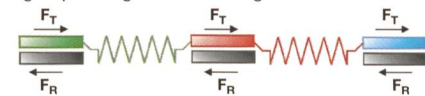
- Geotechnik/Hydrologie
 - Hydrologische Gegebenheiten des betreffenden Gebietes, Starkniederschläge, Schneeschmelze
 - Kornverteilungen und USCS-Klassifikationen für die Beschreibung und Charakterisierung der Materialien in den verschiedenen Schichten
 - Scherversuche zur Beschreibung der Scherparameter
 - Durchlässigkeitsversuche
 - SPT-Tests zur Ermittlung der Lagerungsdichte der verschiedenen Schichten.

Berechnung

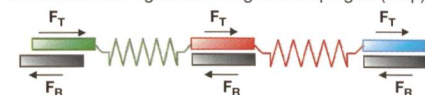
Die Berechnung muss sich in der Regel auf eine Auswahl von obigen Resultaten und Grundlagen stützen. Die zusätzlich nötigen Schätzungen und Extrapolationen können in ihren Auswirkungen durch Proberechnungen bewertet und korrigiert werden.

Das Modell bezieht sich auf die vorangegangenen Darstellungen (vgl. Bilder 3–5).

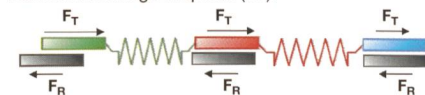
Eigenspannungszustand zu Beginn.



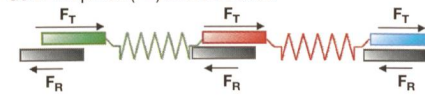
Spannungsaufbau im Bereich des Anrisspunktes (AP) z. B. durch Ansteigen des Hangwasserspiegels (Wsp).



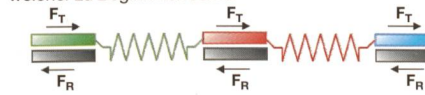
Durch Verlängerung des Zustandes nimmt die Spannung im ganzen Körper zu. Das heisst, Punkt «Z» wandert Richtung Fusspunkt (FP).



Der ganze Gleitkörper deformiert sich, weil «Z» den Fusspunkt (FP) überschreitet.



Die Deformation klingt ab. Der Spannungszustand nähert sich wieder dem Eigenspannungszustand an, welcher zu Beginn herrschte.



F_T = treibende Kräfte F_R = rückhaltende Kräfte

Bild 7. Rheologisches Modell.

Einfluss der Eingabewerte

Das vorgestellte Berechnungsverfahren reagiert auf die geotechnischen Eingabewerte sehr sensibel. Es ist aus diesem Grund sinnvoll, den Untersuchungsaufwand auf einem entsprechend hohen Niveau zu führen. Dazu

eignen sich die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Labor- und Feldversuche. Gleichzeitig sind die Resultate und die Übertragung von Versuchswerten auf den realen Kriechhang kritisch zu werten. Zu diesem Zweck sind bereits vorhandene Deformationsmessungen vom zu untersuchenden Kriechhang hilfreich.

Die Eingabewerte wirken sich auf die Deformation wie folgt aus:

- Nimmt der Reibungswinkel ϕ' zu, so nimmt die Deformation ab. Dasselbe Verhalten zeigt sich, wenn eine Kohäsion c' in der Berechnung mitberücksichtigt wird.
 - Der verwendete E-Modul und die Deformationen sind umgekehrt proportional. In erster Näherung hat sich ein E-Modul von 200 kPa bewährt.
 - Längere Gleithorizonte rufen auf Grund des elastischen Ansatzes auch grössere Deformationen hervor.
 - Die Gleithorizonte verlaufen vielfach in einer Tiefe von 15 bis 25 m.
 - Ein steigender Hangwasserspiegel innerhalb des Kriechbereiches lässt die Deformationen anwachsen.
 - Ein steigender Seespiegel entlastet den Fussbereich.
 - Ein rasch sinkender Seespiegel begünstigt Deformationen.
 - Oszillierende Seespiegel sind meist nur der im Fussbereich wirksame Teil der Ursachen für Kriechbewegungen. Im Anrissbereich kommen als Ursache z.B. Schneeschmelze oder Starkniederschläge in Frage.
- Die Bandbreite der Gleitsicherheiten der einzelnen Hangwasserstände liegt für einen Kriechhang meist zwischen $FS = 1,1$ bis $1,4$.

Für höhere minimale Sicherheiten lässt sich mit dem vorgestellten Verfahren nur unter wenig realitätsnahen Bedingungen ein Kriechen erzwingen.

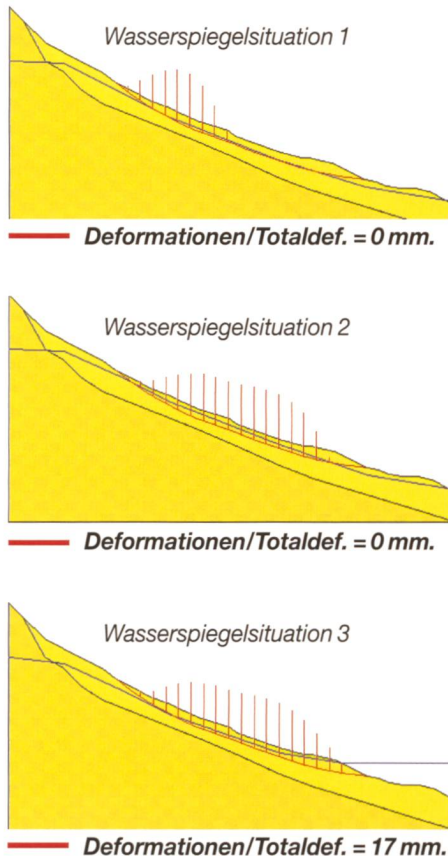
Für minimale Sicherheiten über $FS = 1,5$ kann davon ausgegangen werden, dass ein Kriechen im vorgestellten Sinn nicht möglich ist.

Beispiele aus der Praxis

Kommentar zu den Beispielen

Die angegebenen Totaldeformationen (Totaldef.) entsprechen horizontalen Verschiebungen nach dem Durchlaufen der verschiedenen Wasserstände. Die roten Vertikallinien in den Grafiken stellen die Horizontalkräfte zwischen den einzelnen Lamellen dar. Die dargestellten Gleitkörper wurden in jeweils 20 Lamellen unterteilt. Für den plastischen Berechnungsteil wurde der Ansatz nach Janbu gewählt.

Beispiel A



Beispiel A

Dieses Beispiel steht für einen relativ steilen Hang. Entgegen der subjektiven Annahme vor der Berechnung, die Deformationen müssten erst mit absinkendem Seewasserspiegel eintreten, zeigt die Berechnung, dass in diesem Falle die Deformationen nach dem Ansteigen des Seespiegels eintreten. In diesem Fall genügt die Fussentlastung, um eine Entspannung der Kriechmasse auszulösen.

Beispiel B

Dieses Beispiel zeigt einen «klassischen» Absenkvorgang in einem Staubecken. Anhand der Wasserspiegelsituationen 1–5 (Zustände) kann relativ gut nachvollzogen werden, wie sich die Horizontalkräfte innerhalb des Gleitkörpers verändern. Hier erfolgt die Entspannung der Kriechmasse bei tiefem Seespiegel.

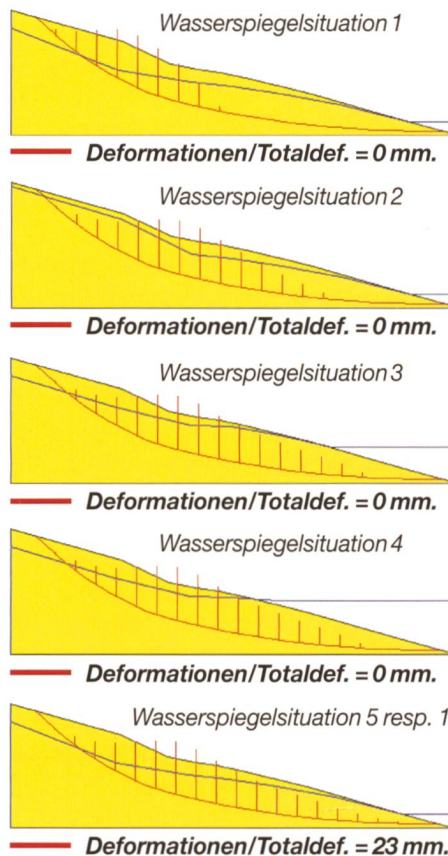
Aussichten

Das vorgestellte Verfahren erlaubt eine differenzierte Beurteilung des Deformationsverhaltens von Kriechhängen in einem Reibungsmaterial.

Es unterscheidet sich klar von den typischen Felssturz- und Rutschphänomenen, die meist mit der Materialverwitterung und der damit einhergehenden Reduktion der Kohäsion zusammenhängen.

Da die Gleitsicherheiten nicht unter $FS = 1$ fallen, können die Sicherheitsvorkehrungen (z.B. extra Freibord) gegenüber dem

Beispiel B



die Sicherheitsvorstellungen traditionell prägenden Felssturzphänomen stark reduziert werden.

Die typischen minimalen Gleitsicherheiten liegen allerdings auch bei dieser Berechnungsmethode in der Grössenordnung von $FS = 1,1$, d.h. deutlich unter dem meist geforderten Minimalwert von $FS = 1,3$.

Es wäre sinnvoll, für Kriechhänge, die klar einem dem vorgestellten Verfahren folgenden Verhalten zugeordnet werden können, eine eigene Klasse zu schaffen.

Der Überwachungsaufwand könnte dem relativ geringen Risiko so angepasst werden, dass die Kriechbewegung in ihrer Abhängigkeit von den Niveauänderungen der Hangwasserspiegel beurteilt wird. Das kurzfristige Abtauchen der Gleitsicherheit unter $FS = 1,3$ (bei einem Starkniederschlag oder bei Schneeschmelze) könnte, ähnlich wie ein Hochwasserereignis geringer Jährlichkeit, den üblichen Belastungen der Stauanlage zugeordnet werden.

Dank

Der vorliegende Artikel entstand mit Hilfe des Fonds de Recherche des Schweizerischen Tal-sperrenkomitees. An dieser Stelle danken wir für diese Unterstützung ganz herzlich. Gleichzeitig danken wir all jenen Personen, die sich mit Hingabe und Geduld an den im Verlauf seines Entstehens geführten Diskussionen beteiligten.

Literaturhinweise

- Ashford S. A., Roth L. H., Madsen S. L., Anderson D. G. (1992): $FS = 1,5$: Is it appropriate for Embankment Design?, ASCE Geotechnical Special Publication Nr. 31., Berkeley, 1992, Vo. 2, pp. 1112–1125.
- Huder J., Lang H. J. (1980): Zur Frage der Sicherheitsüberlegungen im Grundbau, Mitt. IGB ETH Zürich, Nr. 115 (1980).
- Janbu N. (1973): Slope Stability Computations, Embankment-Dam Engineering, Casagrande Volume, Wiley-Interscience Publication, pp. 47–86.
- Nascimento M. U. (1953): Stability and Deformations of Slopes and Earth Dams, Research on Pore-Pressure Measurements, Groundwater Problems, Written Discussion, Proc. IIIrd Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Switzerland 1953, Vo. 3, p. 223.
- Newmark N. M. (1965): Effects of Earthquake on Dams and Embankments, Rankine Lecture, Geotechnique, Vol. 15, No. 2.
- Skempton A. W., Hutchinson J. (1969): Stability of natural Slopes and Embankment Foundation, State of-the-Art Report, Proc. VIIth Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Mexico 1969, State of the Art Vol., pp. 291–340.
- Vulliet L., Desai C. S. (1989): Viscoplasticity and finite elements for landslide analysis. Proc. XIIth Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Rio de Janeiro, Brazil 1989, Vo. 2, pp. 801–806.
- Vulliet L. (1994): Le rôle des déformations dans les problèmes de stabilité, Mitt. SGBF 129, pp. 21–26.
- Wilson S. D., Squier R. (1969): Earth and Rock-fill Dams, State of-the-Art Report, Proc. VIIth Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Mexico 1969, State of the Art Vol., pp. 154–157.

Anschrift der Verfasser

Arno Curschellas, Felix Steiger, Büro F. Steiger, Beratender Ingenieur, Salvatorenstrasse 70, CH-7000 Chur.